

Influences of False Subsurface Wind Data on Spatial Pattern of the Northern Hadley Circulation and Future Estimation of the Sinking Branch in Boreal Summer

Zhihang Xu, Shujuan Hu*, Siyi Wang, Jianjun Peng

College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou Gansu
Email: xuzhh17@lzu.edu.cn, *hushuju@lzu.edu.cn

Received: Nov. 18th, 2019; accepted: Dec. 4th, 2019; published: Dec. 11th, 2019

Abstract

Based on monthly data of wind field from 12 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) models and the stream function of meridional circulation derived from the three-pattern decomposition global atmospheric circulation method (3P-DGAC), we investigate influences of false subsurface wind data on spatial pattern of the Northern Hadley circulation (HC) and future estimation of the sinking branch in boreal summer. It is found that errors caused by false subsurface wind data are passed to the stream function in the whole layer by vertically integrated process, which could lead to a false “minor circulation” embedded within Northern Hemispheric Hadley circulation (NHHC) in summer. The “minor circulation” would cause miscalculation of the location of the NHHC sinking branch, and it also has a significant effect on the accurate calculation of poleward expansion trend of NHHC. The result of the quantitative analysis shows that, in the 2040-2099 period under Representative Concentration Pathway 8.5 (RCP8.5) scenarios, the false wind data would lead to an overestimation of the poleward expansion trend of NHHC in summer.

Keywords

Hadley Circulation, Stream Function of Meridional Circulation, False Wind Data, Spatial Pattern, Location of the Sinking Branch

地表以下虚假的风场资料对北半球夏季Hadley环流空间模态及下沉支未来预估的影响

许之航, 胡淑娟*, 王思懿, 彭建军

*通讯作者。

文章引用: 许之航, 胡淑娟, 王思懿, 彭建军. 地表以下虚假的风场资料对北半球夏季 Hadley 环流空间模态及下沉支未来预估的影响[J]. 气候变化研究快报, 2020, 9(1): 1-10. DOI: 10.12677/ccr.2020.91001

兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州
Email: xuzhh17@lzu.edu.cn, hushuju@lzu.edu.cn

收稿日期: 2019年11月18日; 录用日期: 2019年12月4日; 发布日期: 2019年12月11日

摘要

本文利用12个CMIP5气候模式的风场资料, 采用全球大气环流三型分解模型中的经圈型环流流函数, 研究了地表以下虚假的风场资料对北半球夏季Hadley环流空间模态及下沉支位置未来预估的影响。结果表明: 在计算Hadley环流的流函数时, 由于垂直积分过程会将地表以下虚假的风场资料所带来的误差传递至整层的流函数, 从而导致北半球夏季Hadley环流的空间模态中存在虚假的“小环流”, 该“小环流”会导致Hadley环流下沉支位置的误判, 并对下沉支位置变化趋势的准确计算产生较大影响; 进一步的定量分析发现, 在未来排放情境下(RCP8.5), 地表以下虚假的风场资料所引起的误差会导致北半球夏季Hadley环流下沉支向极扩张趋势的高估。

关键词

Hadley环流, 经圈型环流流函数, 虚假风场资料, 空间模态, 下沉支位置

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

Hadley 环流是全球大气环流中强度最强、尺度最大的垂直环流, 它在南北半球各有一个闭合的环流圈, 其公共上升支与赤道辐合带对应, 下沉支与南北半球的副热带高压带相对应, 引起南北半球的质量交换以及低纬度地区和中高纬地区的角动量、热量和水汽交换[1] [2], 在全球的天气、气候变化过程中起着十分重要的作用。

利用再分析资料的研究表明, 近几十年来, 北半球冬季 Hadley 环流显著增强[3] [4] [5] [6], 下沉支位置显著地向极扩张[7] [8] [9] [10] [11], 这导致赤道地区的上升运动和副热带地区的下沉运动的加强[12], 使得赤道地区云量和上层水汽增加, 副热带地区的云量和降水减少, 干旱加剧。同时, Hadley 环流下沉支位置的移动会导致全球降水和气温的时空分布发生变化, 对全球自然生态、农业以及水资源等产生重要的影响[8] [13]。

此外, 利用 CMIP5 气候模式资料对 Hadley 环流气候变化问题的研究表明, CMIP5 模式虽能得到 Hadley 环流下沉支向极地扩张的结论, 但是扩张的程度比再分析资料和观测资料得到的结果小将近一个量级[14] [15] [16] [17]。例如, Hu *et al.* (2013)利用 CMIP5 模式模拟结果发现, 在全球变暖背景下, Hadley 环流在 1979 至 2005 年期间向两极扩张了大约 0.15°, 仅仅是再分析资料结果的六分之一[16]。因此, 关于再分析资料和模式模拟的 Hadley 环流向极扩张的程度是否存在显著差异仍需进一步的研究。

Mathew *et al.* (2016)利用 4 套再分析资料, 通过研究 1979 至 2012 年 Hadley 环流的质量流函数演变特征发现, 北半球夏季 Hadley 环流中存在一个反向的“小环流”, 该“小环流”会引起 Hadley 环流下沉支位置的误判[18]。然而, Cheng *et al.* (2018)利用 5 套再分析资料的研究指出, 北半球夏季 Hadley 环

流空间模态中的“小环流”结构是由于计算 Hadley 环流的流函数时,未考虑地表以下虚假的风场资料的影响而错误引入的[19]。也就是说,再分析资料中,地面气压小于 1000 hPa 范围内的虚假风场资料会对北半球夏季 Hadley 环流空间模态的计算造成显著的影响,从而导致 Hadley 环流下沉支位置的计算存在较大的误差。

上述关于 Hadley 环流的空间模态及下沉支位置在计算过程中存在误差的研究工作均是基于再分析资料开展的,关于模式模拟的研究未见报道。本文利用 CMIP5 气候模式,通过分析模式模拟的 Hadley 环流的空间模态、强度及下沉支位置的变化趋势受地表以下虚假风场资料的影响情况,研究未来排放情景下 Hadley 环流下沉支位置的长期预估结果受计算误差的影响程度,为准确利用模式开展 Hadley 环流的未来气候变化研究提供理论依据。

2. 资料与方法介绍

2.1. 资料

本文采用了 12 个 CMIP5 全球气候模式(见表 1)模拟的地面气压数据及月平均水平风场 u 、 v 数据,包括 CMIP5 全强迫历史模拟试验和 RCP 未来情景 RCP8.5 模拟试验的结果,其中历史模拟试验的时间段为 1979 年至 2005 年,未来情景试验的时间段为 2040 年至 2099 年。为了方便应用,所有的模式结果都被插值到 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 分辨率的水平网格上,垂直方向上取 17 层(1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10 hPa)。

Table 1. Description of the 12 coupled climate models participating in the CMIP 5

表 1. 本文采用的 12 个 CMIP5 模式的基本介绍

Model Name	Institution (Abbreviation)	Atmospheric Grids (Lat \times Lon \times Level)
BCC-CSM1-1	BCC	64 \times 128 \times 17
BCC-CSM1-1-m	BCC	160 \times 320 \times 17
BNU-ESM	GCESS	64 \times 128 \times 17
CanESM2	CCCMA	64 \times 128 \times 22
CMCC-CM	CMCC	240 \times 480 \times 17
CMCC-CMS	CMCC	96 \times 192 \times 33
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS	128 \times 256 \times 17
FIO-ESM	FIO	64 \times 128 \times 17
MPI-ESM-LR	MPI-M	96 \times 192 \times 25
MPI-ESM-MR	MPI-M	96 \times 192 \times 25
NorESM1-M	NCC	96 \times 144 \times 17
NorESM1-ME	NCC	96 \times 144 \times 17

2.2. 方法

研究表明,全球大气环流三型分解模型中的经圈型环流的流函数能够较好的表示全球纬向平均及局地 Hadley 环流的特征[20] [21],因此,本文选用该方法计算全球纬向平均的 Hadley 环流的质量流函数,计算公式如下:

$$\psi = \frac{2\pi a \cos \varphi}{g} \int_{P_s}^p [v_H] dp \quad (1)$$

其中 a 表示地球半径, φ 为纬度, g 为重力加速度, p 表示气压, P_s 代表地面气压, v_H 是全球大气环流三

型分解方法中的经圈型环流的南北向速度， $[v_H]$ 代表了 v_H 的全球纬向平均。事实上，我们只需要将模式资料的水平速度场 u 和 v 代入全球大气环流三型分解模型，通过计算即可得到经圈型环流的流函数与速度场。关于全球大气环流三型分解模型的意义及计算方法参见文献[20] [21] [22]，这里不再赘述。

3. 结果分析

3.1. Hadley 环流空间模态计算的差异

根据公式(1)计算 Hadley 环流的流函数时，若不去除地表以下虚假的 v_H 风场资料，直接输入经圈型环流的南北向速度场 v_H 进行计算，由此得到的 1979~2005 年 12 个 CMIP5 气候模式模拟的北半球夏季 7 月份 Hadley 环流空间模态如图 1 所示。由图 1 可看出，12 个模式中有 4 个模式(BNU-ESM、FIO-ESM、NorESM1-M、NorESM1-ME)在北半球 Hadley 环流中出现了反向旋转的“小环流”，其余模式虽然没有明显的“小环流”，但均呈现出双中心的结构特征。

然而，我们观察图 2 发现，在计算 Hadley 环流的流函数时，若先去除地表以下虚假的 v_H 风场资料，再代入公式(1)计算，得到的 1979~2005 年 12 个 CMIP5 气候模式模拟的北半球夏季 7 月份 Hadley 环流气候态中的“小环流”(如图 1 中)结构消失，Hadley 环流均呈现单中心的结构。对比图 1 和图 2 说明，地表以下虚假的 v_H 风场资料对 Hadley 环流空间模态的计算影响显著。以 BCC-CSM1-1 模式为例，在订正计算误差前，Hadley 环流的流函数值在 $15^{\circ}\text{N}\sim 37^{\circ}\text{N}$ 范围为正值，但在订正计算误差后，流函数值为正值的区域变为 $15^{\circ}\text{N}\sim 32^{\circ}\text{N}$ ，Hadley 环流北支宽度和北半球下沉支位置均发生了改变，其他模式的结果也有类似的变化。

以上的结果表明，地表以下虚假的 v_H 风场资料会对 Hadley 环流空间模态的计算产生误差，特别是由此产生的虚假的“小环流”结构，会对北半球 Hadley 环流下沉支位置的准确计算产生重要影响。因此，在开展 Hadley 环流相关的研究时需要考虑地表以下虚假的 v_H 风场资料所引入的计算误差。

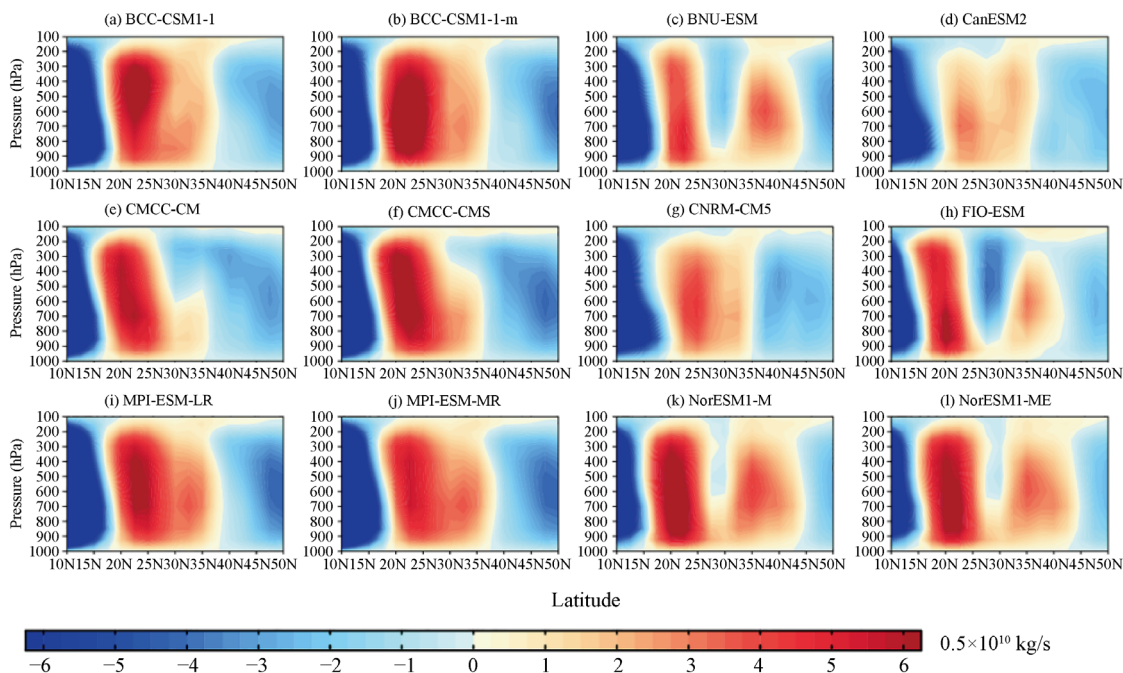


Figure 1. The uncorrected climatological characteristics of the Northern Hemisphere Hadley circulation represented by the stream function ψ in Equation (1) in boreal July (1979-2005)

图 1. 误差订正前，CMIP5 模式模拟的 7 月北半球 Hadley 环流的气候态(1979~2005)

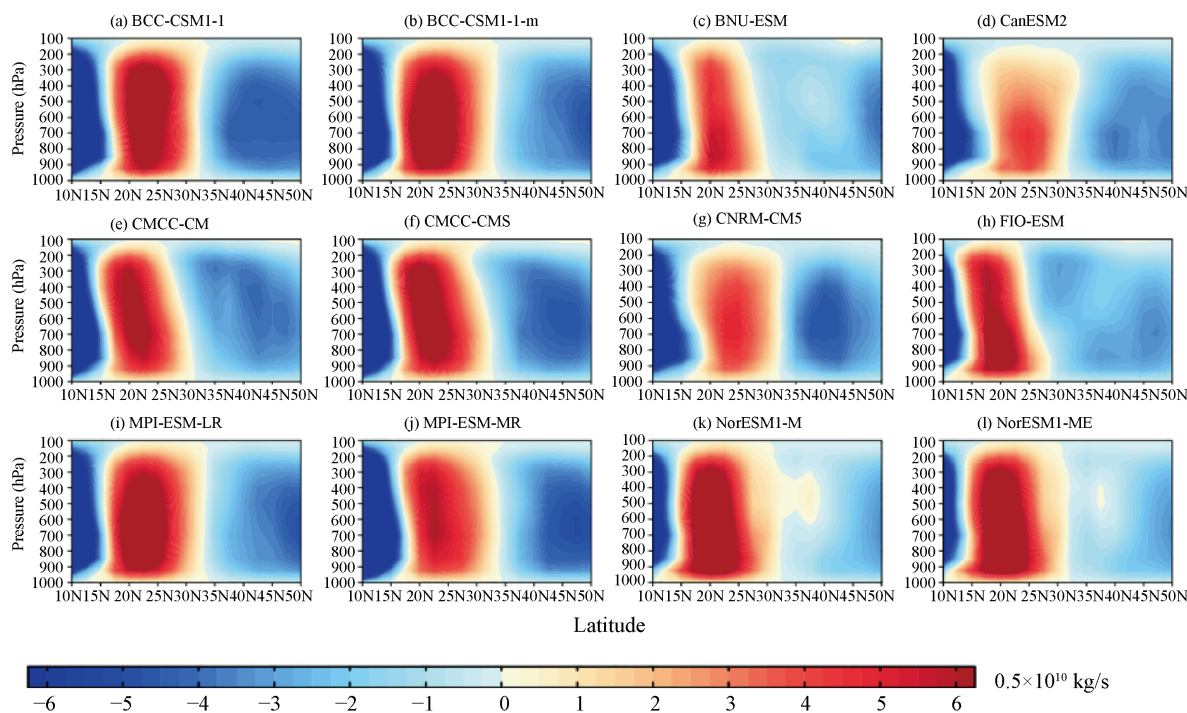


Figure 2. The corrected climatological characteristics of the Northern Hemisphere Hadley circulation represented by the stream function ψ in Equation (1) in boreal July (1979-2005)

图 2. 误差订正后, CMIP5 模式模拟的 7 月北半球 Hadley 环流的气候态(1979~2005)

3.2. Hadley 环流空间模态计算差异的原因

1979~2005 年 12 个 CMIP5 模式模拟的 7 月全球纬向平均的北半球经圈型环流 v_H 风场, 在去除地表以下虚假风场资料值前后的差异如图 3 所示。我们发现, v_H 风场的差异主要集中在对流层低层(700~1000 hPa), 且以低纬度地区的南风和中纬度地区的北风差异为主要特征, 而在 700 hPa 以上的对流层中上层, v_H 风场的差异十分微弱。然而, 观察图 4 中 12 个 CMIP5 模式模拟的 1979~2005 年 7 月全球纬向平均的北半球 Hadley 环流流函数的差异发现, 虽然虚假的 v_H 风场资料的差异主要存在于 700 hPa 以下的对流层低层, 但根据 v_H 风场计算的 Hadley 环流流函数的差异却是自地面到高空都存在, 显著地表现为 30°N 以南的低纬度逆时针异常环流和 30°N 以北的中纬度顺时针异常环流特征。这说明经过公式(1)的计算, 原来仅存在于低空的 v_H 风场差异通过垂直积分过程影响了整层 Hadley 环流的空间模态。进一步的计算分析发现, 北半球 Hadley 环流在夏季最弱, 而地表以下虚假的 v_H 风场资料所导致的如图 4 所示的异常环流流函数的量级与误差订正前 Hadley 环流流函数的量级相当, 而在其它季节, v_H 风场的差异引起的异常环流的量级远小于 Hadley 环流本身, 这就解释了为什么在误差订正前只有在北半球夏季 Hadley 环流中会出现“小环流”结构。

3.3. Hadley 环流强度、下沉支及宽度的差异

据公式(1)计算的 Hadley 环流的流函数, 其负值代表南半球 Hadley 环流, 正值代表北半球 Hadley 环流。因此, 南北半球 Hadley 环流的强度分别定义为 30°S ~ 30°N 范围内流函数的极小值和极大值[23], 且用 500 hPa 高度上流函数 0 值所在的纬度表示 Hadley 环流上升支或下沉支位置。记南北半球 Hadley 环流的上升支与下沉支之间的纬度数为其宽度, 记南北半球 Hadley 环流的宽度之和为总宽度。由图 5 中误差订正前后的对比分析可知, 在 CMIP5 的历史模拟阶段, 地表以下虚假的 v_H 风场对各月份 Hadley 环流强

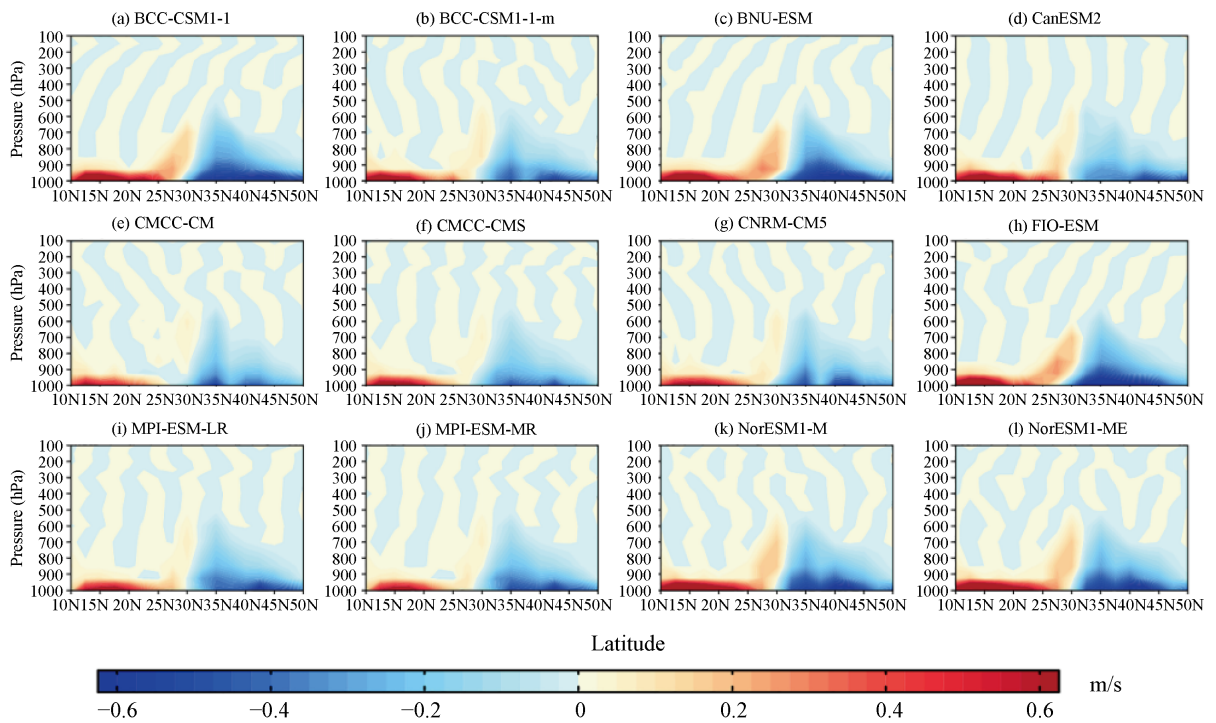


Figure 3. The difference between the uncorrected and corrected global zonally averaged v_H in the Northern Hemisphere in boreal July (1979-2005)

图 3. 误差订正前后, CMIP5 模式模拟的 7 月全球纬向平均的北半球经圈型环流 v_H 风场的差异(1979~2005)

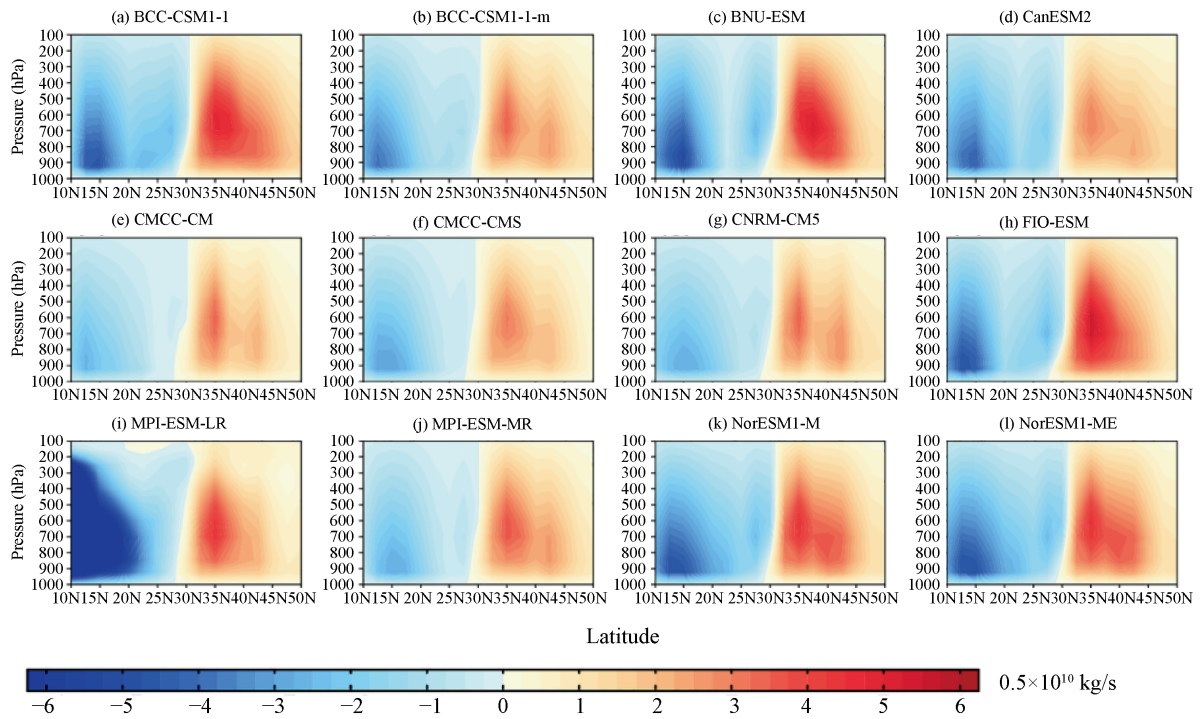


Figure 4. The difference between the corrected and uncorrected stream function ψ of the Northern Hemisphere Hadley circulation in boreal July (1979-2005)

图 4. 误差订正前后, CMIP5 模式模拟的 7 月全球纬向平均的北半球 Hadley 环流流函数的差异(1979~2005)

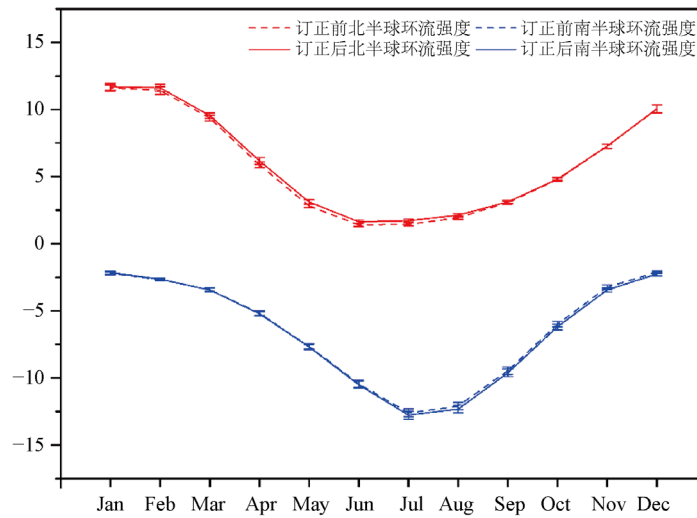


Figure 5. The annual characteristics of the intensity (unit: $2 \times 10^{10} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$) of global zonally averaged Hadley circulation before and after error correction (1979-2005), the error bars represent 95% confidence interval

图 5. 误差订正前后, 全球纬向平均的 Hadley 环流强度(单位: $2 \times 10^{10} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)的年循环气候特征(1979~2005), 误差棒代表 95%置信区间

度的影响都十分微弱。然而, 由图 6(a)可知, 虚假的 v_H 风场使得 6~9 月份北半球 Hadley 环流下沉支位置的计算存在较大程度的北移误差。图 6(b)说明, 6~9 月份北半球 Hadley 环流下沉支位置的计算误差导致北半球环流宽度及南北半球环流总宽度均变得更宽。进一步的定量分析表明, 地表以下虚假的 v_H 风场引起的 7 月份北半球 Hadley 环流下沉支位置的计算误差达到 5.84° , 也使得南北半球环流总宽度的计算误差达到 6.88° 。

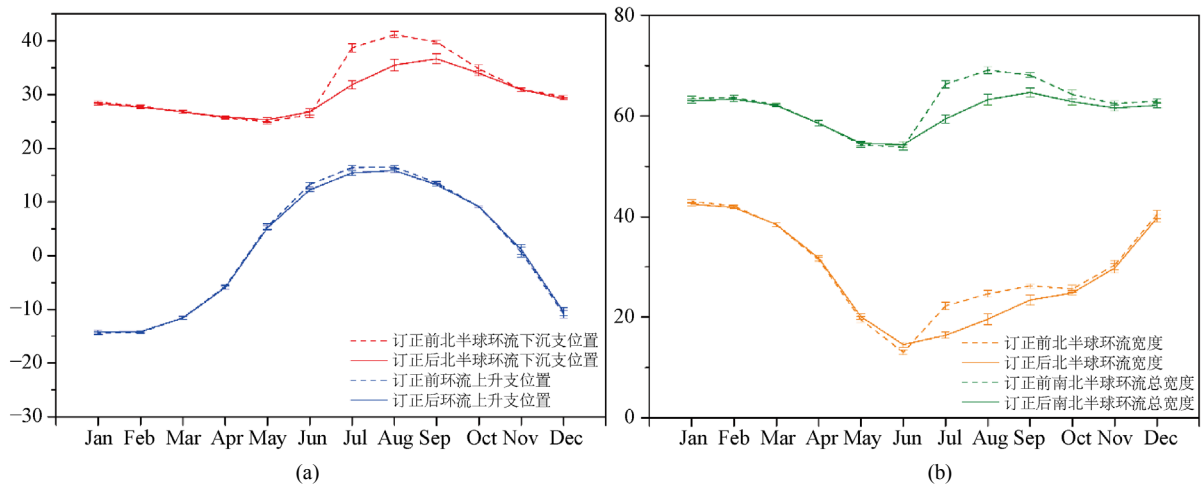


Figure 6. The annual characteristics of the rising/sinking branch (a) and width (b) of global zonally averaged Hadley circulation before and after correction (1979-2005), the error bars represent 95% confidence interval

图 6. 误差订正前后, 全球纬向平均的 Hadley 环流上升/下沉支位置(a)和宽度(b)的年循环气候特征(1979~2005), 误差棒代表 95%置信区间

3.4. Hadley 环流未来预估特征的差异

Tao *et al.* (2015)的研究指出, 未来不同排放情景下, Hadley 环流的变化趋势在 2040~2099 年比

2006~2039 年更显著[24]。因此本节选取 2040~2099 的时间段来研究北半球 Hadley 环流的未来预估特征。通过对比图 7(a)和图 7(b)发现, 在 RCP8.5 情形下, 地表以下虚假的 v_H 风场资料对北半球 Hadley 环流强度的未来变化趋势影响不大。也就是说, 无论是误差订正前还是误差订正后, 图 7(a)和图 7(b)中 6~9 月份北半球 Hadley 环流的流函数正值中心均位于负的趋势带上, 说明模式模拟的未来北半球夏季 Hadley 环流呈现减弱的趋势。然而, 地表以下虚假的 v_H 风场资料对北半球夏季 Hadley 环流下沉支位置的未来预估结果影响显著。如图 7 所示, 误差订正前, 6~9 月份的流函数 0 值线在 40°N 左右的正趋势带上, 表明未来北半球的 Hadley 环流将向极扩张, 而误差订正后, 流函数 0 值线位于负的趋势带上, 表明未来北半球的 Hadley 环流下沉支位置将向赤道偏移。进一步的定量分析发现, 误差订正前, 6~9 月份北半球夏季 Hadley 环流下沉支位置的未来变化趋势为 0.097°每十年, 而误差订正后的未来变化趋势为-0.067°每十年, 这说明地表以下虚假的 v_H 风场资料会导致 CMIP5 模式对北半球夏季 Hadley 环流向极扩张趋势的高估。因此, 我们在利用 CMIP5 模式资料研究 Hadley 环流的未来演变特征时, 需要去除地表以下虚假的 v_H 风场资料, 以避免其引起的计算误差。

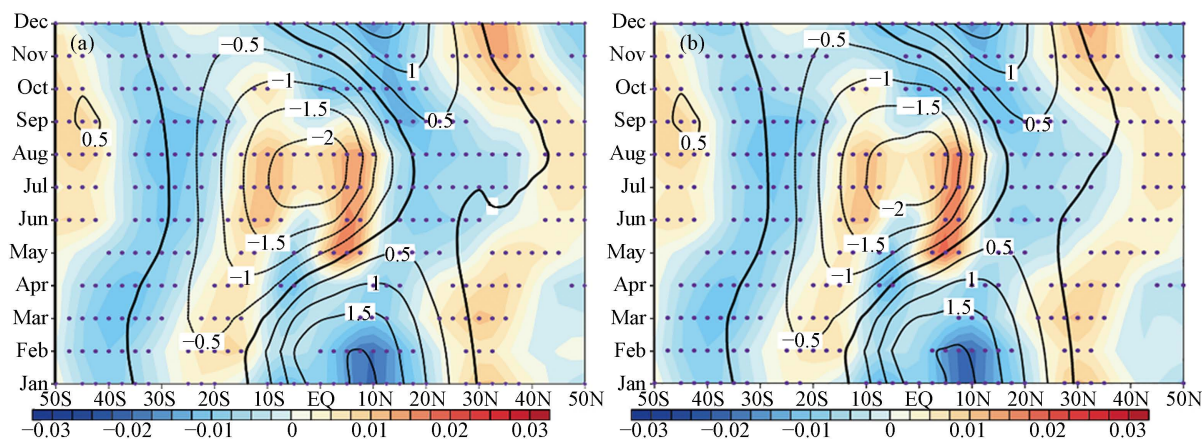


Figure 7. Month-latitude plots of the climatological characteristics of stream function ψ (contours, unit: $0.5 \times 10^{10} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$) and its future trend (color shading, unit: $0.5 \times 10^{10} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ per decade) at 500 hPa (2040-2099) under RCP8.5 scenario before (a) and after error correction (b). Black dots in (a) and (b) represent the trend has passed 95% statistical significance test
图 7. RCP8.5 情形下, 500 hPa 高度上 Hadley 环流流函数气候态(等值线, 单位: $0.5 \times 10^{10} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)与未来变化趋势(填色, 单位: $0.5 \times 10^{10} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 每十年)的年循环差异(2040~2099), 打点部分表示该区域的变化趋势通过了 95%信度检验

4. 结论

本文利用 12 个 CMIP5 气候模式资料, 研究了地表以下虚假的风场资料对北半球夏季 Hadley 环流的空间模态、强度、下沉支位置及其未来预估计算的影响, 得出以下主要结论:

- (1) 地表以下虚假的风场资料会导致北半球夏季 Hadley 环流的空间模态中出现虚假的“小环流”结构, 从而引起 Hadley 环流下沉支位置的误判, 并对下沉支位置变化趋势的准确计算产生较大影响。
- (2) 北半球 Hadley 环流在夏季最弱, 位于地表以下的虚假风场资料所引起的整层异常环流的量级与原 Hadley 环流的量级相当, 而其它季节, 异常环流的量级远小于 Hadley 环流本身, 这是导致北半球夏季 Hadley 环流空间模态计算中出现虚假“小环流”结构的主要原因。
- (3) 在 RCP8.5 情形下, 地表以下虚假的风场资料对 Hadley 环流强度的未来变化趋势影响不大, 但对夏季 Hadley 环流下沉支位置的未来预估结果影响显著。在未来 2040~2099 的时间段内, 地表以下虚假的风场资料会引起下沉支位置的未来变化趋势存在每十年 0.164°的差异, 导致北半球夏季 Hadley 环流向极扩张趋势的高估。因此, 在利用 CMIP5 模式资料研究北半球 Hadley 环流的未来演变特征时, 需要去除

地表以下虚假的风场资料的影响。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(41775069, 41975076)和国家重点研发计划项目(2017YFC1502305)共同资助。

参考文献

- [1] 吴国雄, Stefano, T. 平均经圈环流在大气角动量和感热收支中的作用[J]. 大气科学, 1988, 12(1): 8-17.
- [2] Bowman, K.P. and Cohen, P.J. (1997) Interhemispheric Exchange by Seasonal Modulation of the Hadley Circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **54**, 2045-2059. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054<2045:IEBSMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<2045:IEBSMO>2.0.CO;2)
- [3] Diaz, H.F. and Bradley, R.S. (2004) The Hadley Circulation: Present, Past and Future. Springer, New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2944-8>
- [4] Mitas, C.M. and Christos, A. (2005) Has the Hadley Cell Been Strengthening in Recent Decades? *Geophysical Research Letters*, **32**, L03809. <https://doi.org/10.1029/2004GL021765>
- [5] 马杰, 李建平. 冬季北半球 Hadley 环流圈的增强及其与 ENSO 关系[J]. 自然科学进展, 2007, 17(11): 1524-1531.
- [6] Ma, J. and Li, J. (2008) The Principal Modes of Variability of the Boreal Winter Hadley Cell. *Geophysical Research Letters*, **35**, L01808. <https://doi.org/10.1029/2007GL031883>
- [7] Lucas, C., Timbal, B. and Nguyen, H. (2014) The Expanding Tropics: A Critical Assessment of the Observational and Modeling Studies. *Wires Climate Change*, **5**, 89-112. <https://doi.org/10.1002/wcc.251>
- [8] Seidel, D.J., Fu, Q., Randel, W.J., et al. (2008) Widening of the Tropical Belt in a Changing Climate. *Nature Geoscience*, **1**, 21-24. <https://doi.org/10.1038/ngeo.2007.38>
- [9] Fu, Q. (2006) Enhanced Mid-Latitude Tropospheric Warming in Satellite Measurements. *Science*, **312**, 1179-1179. <https://doi.org/10.1126/science.1125566>
- [10] Hu, Y. and Fu, Q. (2007) Observed Poleward Expansion of the Hadley Circulation since 1979. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **7**, 5229-5236. <https://doi.org/10.5194/acp-7-5229-2007>
- [11] Staten, P.W., Lu, J., Grise, K.M., et al. (2018) Re-Examining Tropical Expansion. *Nature Climate Change*, **8**, 768-775. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0246-2>
- [12] Chen, J., Carlson, B.E. and Delgenio, A.D. (2002) Evidence for Strengthening of the Tropical General Circulation in the 1990s. *Science*, **295**, 838-841. <https://doi.org/10.1126/science.1065835>
- [13] Trenberth, K.E. and Stepaniak, D.P. (2003) Seamless Poleward Atmospheric Energy Transports and Implications for the Hadley Circulation. *Journal of Climate*, **16**, 3706-3722. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3706:SPAETA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3706:SPAETA>2.0.CO;2)
- [14] Johanson, C.M. and Fu, Q. (2009) Hadley Cell Widening: Model Simulations versus Observations. *Journal of Climate*, **22**, 2713-2725. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2620.1>
- [15] Lu, J., Deser, C. and Reichler, T. (2009) Cause of the Widening of the Tropical Belt since 1958. *Geophysical Research Letters*, **36**, L03803. <https://doi.org/10.1029/2008GL036076>
- [16] Hu, Y., Tao, L. and Liu, J. (2013) Poleward Expansion of the Hadley Circulation in CMIP5 Simulations. *Advances in Atmospheric Sciences*, **30**, 790-795. <https://doi.org/10.1007/s00376-012-2187-4>
- [17] Nguyen, H., Lucas, C., Evans, A., et al. (2015) Expansion of the Southern Hemisphere Hadley Cell in Response to Greenhouse Gas Forcing. *Journal of Climate*, **28**, 8067-8077. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0139.1>
- [18] Mathew, S.S., Kumar, K.K. and Subrahmanyam, K.V. (2016) Hadley Cell Dynamics in Japanese Reanalysis-55 Dataset: Evaluation Using Other Reanalysis Datasets and Global Radiosonde Network Observations. *Climate Dynamics*, **47**, 3917-3930. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3051-5>
- [19] Cheng, J., Xu, Z., Hu, P., et al. (2018) Significant Role of Orography in Shaping the Northern Hadley Circulation and Its Poleward Expansion during Boreal Summer. *Geophysical Research Letters*, **45**, 6619-6627. <https://doi.org/10.1029/2018GL079039>
- [20] Hu, S., Cheng, J. and Chou, J. (2017) Novel Three-Pattern Decomposition of Global Atmospheric Circulation: Generalization of Traditional Two-Dimensional Decomposition. *Climate Dynamics*, **49**, 3573-3586. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3530-3>

- [21] Hu, S., Chou, J. and Cheng, J. (2018a) Three-Pattern Decomposition of Global Atmospheric Circulation: Part I Decomposition Model and Theorems. *Climate Dynamics*, **50**, 2355-2368. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2818-4>
- [22] Hu, S., Cheng, J., Xu, M., *et al.* (2018b) Three-Pattern Decomposition of Global Atmospheric Circulation: Part II Dynamical Equations of Horizontal, Meridional and Zonal Circulations. *Climate Dynamics*, **50**, 2673-2686. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3763-1>
- [23] Oort, A.H. and Yienger, J.J. (1996) Observed Interannual Variability in the Hadley Circulation and Its Connection to ENSO. *Journal of Climate*, **9**, 2751-2767. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<2751:OIVITH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<2751:OIVITH>2.0.CO;2)
- [24] Tao, L., Hu, Y. and Liu, J. (2015) Anthropogenic Forcing on the Hadley Circulation in CMIP5 Simulations. *Climate Dynamics*, **46**, 3337-3350. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2772-1>